疏勒河流域降水变化特征研究

季宗虎， 孙栋元， 牛最荣， 王兴繁， 武兰珍，
马亚丽， 陈彩苹， 崔艳强

（甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 基于疏勒河流域5个水文站1956—2020年逐年及其各月降水数据作为基础资料，采用线性倾向、滑动平均、累积距平、Mann-Kendall突变检验、小波分析等方法，对疏勒河流域降水量年际变化过程及其突变性、趋势性、周期性、持续性及不均匀性和集中度等变化特征进行研究。结果表明：疏勒河流域各站点年降水量呈现不同程度的增加趋势，并且各站点降水量分别呈现不同程度的突变性特征，整个流域近60 a降水在时间尺度上呈现出较不均匀分布，在空间尺度上呈现上游降水多、下游降水少的特性。其中，昌马堡站和党城湾站年降水量增长趋势明显，潘家庄站、双塔堡水库站和党河水库站增长趋势不明显。分析表明，未来一段时间内，流域降水将继续呈现增长趋势。

关键词： 疏勒河；降水；Mann-Kendall检验法；趋势性；周期性；R/S分析法

降水作为重要的水文要素，同时也是水循环的基本环节，降水变化对气象学和水文学有着至关重要的作用，分析降水变化特征对水资源的高效利用有重要影响，同时为自然灾害预报系统的发展提供了科学依据。疏勒河流域地处河西走廊西端，承担着整个地区的工农业用水，由于特殊的地理位置降水主要受西风带环流控制，受东亚夏季风影响较弱[1]，雨季较短且降水量极少，降水持续时间短，年降水量呈现出由北向南逐渐增加。因此，降水对该地区的气候变化影响极为敏感，降水特征变化的研究为气候变化、水文预报和水资源区域分布提供了重要依据，对此流域夏季暴雨预报、防灾减灾工作和短期气候研究具有重要作用，为生态建设、经济发展、农业生产奠定了良好基础[2-7]。

目前，关于降水变化特征的研究主要利用实测数据、卫星遥感空间数据和影像资料来进行降水变化趋势、突变及周期规律分析。齐天杰等[8]利用1960—2020年的实时降水监测数据，用Mann-Kendall突变检验法和Morlet小波分析法对研究区多年降水突变、周期变化规律以及降水集中期和集中度进行了研究；杨俊等[4]采用累积距平法等方法分析了黄土高原典型小流域降水量年际变化、年内变化、年代变化和突变特征；张静雯等[9]以武汉市1951—2017年的逐日降水资料为分析基础，利用了Mann-Kendall检验法等方法对区域降水进行分析。疏勒河流域作为河西地区重要的水源地之一，该流域的降水量对于整个河西地区尤为重要，关系到河西地区的经济和生态发展。学者们对疏勒河流域的降水变化进行了广泛研究，孙栋元等[3]利用疏勒河干流3个水文站1956—2016年逐月、逐年降水数据，对该地区降水量年内变化、年代际变化、季节变化和突变特征等进行了分析；王静[10]收集了疏勒河区域内6个雨量测站的数据，采用时序累积法、模比系数差积曲线探究了系列资料的合理性。本文基于前人的分析方法，综合分析了疏勒河流域近60 a降水变化特征，目的在于了解疏勒河流域降水规律，为有效应对汛期和旱期降水提供参考。

收稿日期： 2023-03-27； **修订日期：** 2023-06-09

基金项目： 甘肃省高等学校青年博士基金项目（2022QB-070）；甘肃农业大学科技创新基金—青年导师扶持基金项目（GAU-QDFC-2021-16）；甘肃省重点研发计划项目（21YF5NA015）；甘肃省青年科技基金计划项目（21JR7RA854）；甘肃省水利科学实验研究与技术推广项目（23GSLK092）

作者简介： 季宗虎（1998-），男，硕士研究生，主要从事智慧水利和水资源利用方面研究. E-mail: 2224774843@qq.com

通讯作者： 孙栋元. E-mail: sundy@gsau.edu.cn

1 研究区概况

疏勒河流域位于河西走廊西端，是甘肃省三大内陆河流域之一。地理位置介于92°11′~98°30′E，38°00′~42°48′N(图1)，海拔800~5730 m之间，基本呈现东南高西北低，干流长670 km，流域面积为$4.13×10^4$ km^2。流域属典型内陆干旱半干旱性气候，降水集中在6—9月，年降水量40.2~57.5 mm，年蒸发量2577.4~2653.2 mm，山地对水汽的阻挡与抬升使山区降水相对较多[3,11-12]。其中，昌马堡站位于疏勒河上游，潘家庄站和双塔堡水库站位于疏勒河干流中下游，党城湾站位于疏勒河流域党河上游，党河水库站位于疏勒河流域党河中游。

2 数据与方法

2.1 资料来源与处理

所有数据来源于甘肃省水文站，选用疏勒河流域昌马堡、潘家庄、双塔堡水库、党城湾和党河水库5个水文站1960—2020年逐月降水数据作为基础资料，进行流域降水变化特征的分析。

2.2 研究方法

采用线性倾向拟合与滑动平均来描述降水变化趋势与特征[13-16]；利用累计距平法分析年际变化趋势，同时利用累计距平最大绝对值可判断出大致的突变时间[13-17]；Mann-Kendall检验法是一种非参数检验法，能够很好的进行突变和趋势性分析[14-15,18]；小波分析是降水与时间关系转化为降水频数和时间关系的一种方法，通过分析周期和频数之间的变化关系来确定时间序列的周期性[13-15,19]。利用降水量分配的向量法推演出不均匀性和集中度，可以很好的反应该流域降水的非均匀性分布特征[20-22]，基于重标极差分析法(R/S)的Hurst指数可以定量描述长时间序列数据相关性，其数据大小可作为预测未来变化趋势的依据[23-25]。

3 结果与分析

3.1 降水年变化特征

近60 a疏勒河流域5个水文站降水量总体呈现上升趋势，各特征值见表1。由图2可以看出，5个水文站均呈现增长趋势，其中，昌马堡站降水量线性倾向率为0.505 mm·a^{-1}，年均降水量以5.05 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加，65 a内增加了32.83 mm；潘家庄站降水量线性倾向率为0.069 mm·a^{-1}，年均降水量以0.69 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加，62 a内增加了4.28 mm；双塔堡水库站降水量线性倾向率为0.111 mm·a^{-1}，



图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表1　疏勒河流域各站降水量特征值

Tab. 1　Characteristic values of precipitation at each station in the Shule River Basin

特征值	平均降水量/mm	最大值/mm	最小值/mm	极值差/mm	极值差比
昌马堡	96.4	184.6(2007年)	35.4(1956年)	149.2	5.21
潘家庄	51.4	141.1(1979年)	17.6(1960年)	127.1	7.45
双塔堡水库	52.4	141.1(1979年)	17.6(1960年)	123.5	8.02
党城湾	61.3	298.1(2019年)	17.6(1960年)	280.5	16.93
党河水库	51.8	141.1(1979年)	16.5(1960年)	124.6	8.55

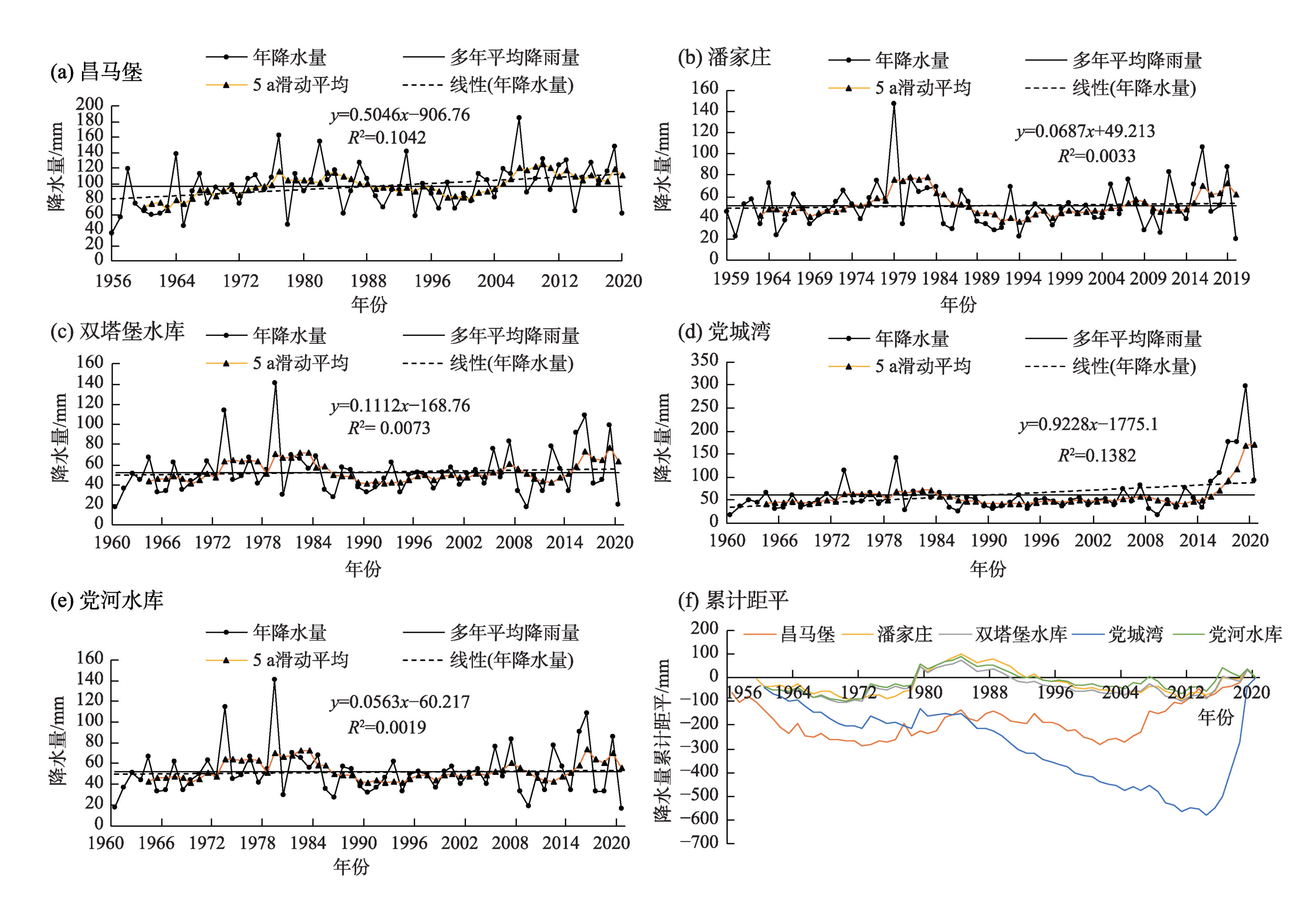


图2　疏勒河流域年降水量和降水量累积距平变化

Fig. 2　Changes in annual precipitation and cumulative distance level of precipitation in the Shule River Basin

年均降水量以1.11 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加,61 a内增加了6.78 mm;党城湾站降水量线性倾向率为0.923 mm·a^{-1},年均降水量以9.23 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加,61 a内增加了56.29 mm;党河水库站降水量线性倾向率为0.056 mm·a^{-1},年均降水量以0.56 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加,61 a内增加了3.42 mm。其中,1956—1972年和1985—2001年(昌马堡站)、1959—1973年和1985—2011年(潘家庄站)、1960—1969年和1984—2011年(双塔堡水库站)、1960—2014年(党城湾站)、1985—2003年和2008—2011年(党河水库站)时间段曲线呈下降趋势,该时间段该流域处于少雨期,1973—1984年和2002—2020年(昌马堡站)、1974—1984年和2012—2020年(潘家庄站)、1970—1983年和2012—2020年(双塔堡水库站)、2015—2020年(党城湾站)、1970—1984年、2004—2007年和2012—2020年(党河水库站)时间段曲线呈上升趋势,该时间段该流域处于多雨期。从疏勒河流域5个站的5 a滑动平均曲线可以看出,除党城湾站年均降水量1964—2014年较为稳定,2014年以后快速上升,其余4个站年均降水量均呈现缓慢增加-减小-增加波动变化趋势。

总体上,疏勒河流域各水文站降水量均以不同程度增长,年降水量各站倾向排序为:党城湾站9.23 mm·(10a)$^{-1}$>昌马堡站5.05 mm·(10a)$^{-1}$>双塔堡

水库站 1.11 mm·(10a)$^{-1}$>潘家庄站 0.69 mm·(10a)$^{-1}$>党河水库站 0.56 mm·(10a)$^{-1}$。

3.2 降水突变性特征

由图 3a 可知，UF_k 和 UB_k 主要相交于 1966 年和 2000 年，并且均位于临界线±1.96之间，因此，昌马堡站平均降水突变发生在 1966 年和 2000 年，由图可知，该站自 20 世纪 50 年代以后 UF_k 均>0，降水呈现上升趋势，尤其在 20 世纪 70 年代前期至 90 年代前期和 21 世纪 10 年代以后，突变曲线通过 0.05 显著性检验（$U_{0.05}$=1.96），表明在此段时间内该站平均降水量上升趋势显著。

由图 3b 可知，UF_k 和 UB_k 主要相交于 1990 年和 2015 年，并且均位于临界线±1.96之间，因此，潘家庄站平均降水突变发生在 1990 年和 2015 年，由图可知，该站自 20 世纪 60 年代前期至 90 年代前期、21 世纪 10 年代中期以后 UF_k>0，表明平均降水量呈上升趋势，尤其在 20 世纪 70 年代后期至 80 年代中期，突变曲线通过 0.05 显著性检验（$U_{0.05}$=1.96），表明在此段时间内该站平均降水量上升趋势显著。

由图 3c 可知，UF_k 和 UB_k 主要相交于 1990 年和 2012 年，并且均位于临界线±1.96之间，因此，双塔堡水库站平均降水突变发生在 1990 年和 2012 年，由图可知，该站自 20 世纪 60 年代以后 UF_k 均>0，降水呈现上升趋势，尤其在 20 世纪 70 年代后期至 80 年代前期，突变曲线通过 0.05 显著性检验（$U_{0.05}$=1.96），表明在此段时间内该站平均降水量上升趋势显著。

由图 3d 可知，UF_k 和 UB_k 主要相交于 1972 年、1980 年和 2015 年，只有 1980 年不在临界线±1.96之间，因此，党城湾站平均降水突变发生在 1972 年左右和 2015 年左右，由图可知，该站自 20 世纪 60 年代以后 UF_k 均>0，表明平均降水量呈上升趋势，尤其在 20 世纪 80 年代前期，突变曲线通过 0.05 显著性检验（$U_{0.05}$=1.96），表明在此段时间内该站平均降水量上升趋势显著。

由图 3e 可知，UF_k 和 UB_k 无明显交点，说明党河水库站近 60 a 降水无突变现象，由图可知，该站自 20 世纪 60 年代以后 UF_k 均>0，表明平均降水量呈上

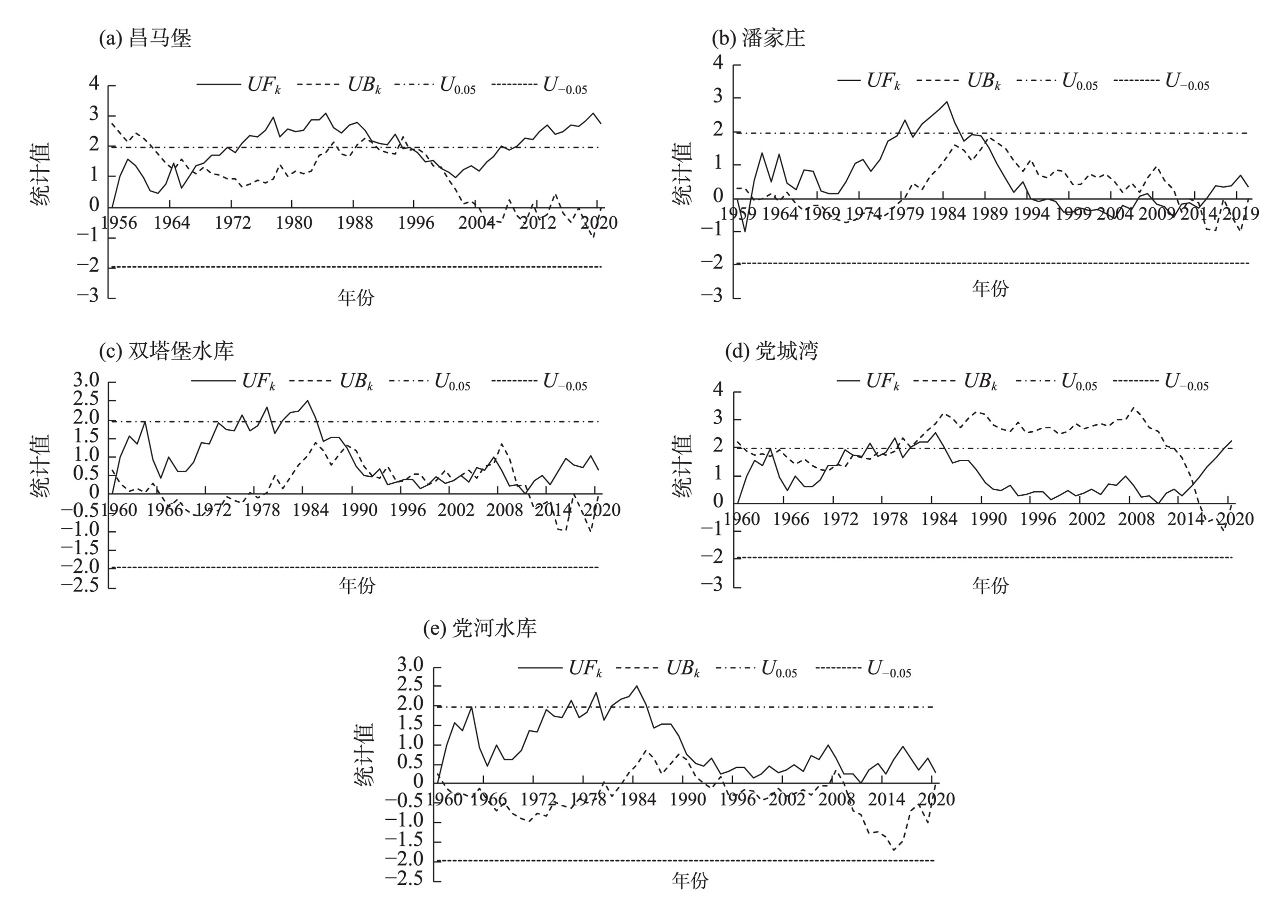


图3 疏勒河流域年平均降水突变检验

Fig. 3 Test of sudden change of annual average precipitation in the Shule River Basin

升趋势,尤其在20世纪80年代前期,突变曲线通过0.05显著性检验($U_{0.05}$=1.96),表明在此段时间内该站平均降水量上升趋势显著。

3.3 降水趋势性特征

疏勒河流域各水文站降水趋势系数如表2所示,从表中可以看出,5个水文站降水量Sen's指标均为正值,有增加趋势,其中,昌马堡站和党城湾站分别以5.05 mm·$(10a)^{-1}$和9.23 mm·$(10a)^{-1}$速率增长,根据M-K趋势检验计算得Z值分别为2.75和2.24,采用信度为95%的显著性检验发现$|Z|>1.96$,通过了显著性检验,增长趋势明显;而潘家庄站、双塔堡水库站、党河水库站分别以0.69 mm·$(10a)^{-1}$、1.11 mm·$(10a)^{-1}$和0.56 mm·$(10a)^{-1}$速率增长,通过M-K趋势检验计算得$|Z|<1.96$,均未通过显著性检验,增长趋势不明显。

3.4 降水周期性特征

采用小波分析法计算疏勒河流域近60 a全年降水小波分析变换系数和小波方差,并做出相应实部时频图和方差图。由图4a可知,昌马堡站全年降水的小波实部图主要存在55~60 a、5~10 a和2~5 a 3个特征时间尺度,从小波方差图可以看出,存在56 a、8 a、4 a 3个明显的波峰,所以该站全年降水的第一主周期为56 a,第二主周期为8 a,第三主周期为4 a;由图4b可知,潘家庄站全年降水主要存在52~60 a和28~34 a 2个特征时间尺度,存在58 a、32 a、4 a 3个明显的波峰,所以该站全年降水的第一主周期为58 a,第二主周期为32 a,第3主周期为4 a;由图4c可知,双塔堡水库站全年降水主要存在53~58 a 1个特征时间尺度,存在55 a、12 a、5 a 3个明显的波峰,所以该站全年降水的第1主周期为55 a,第二主周期为12 a,第三主周期为5 a;由图4d可知,党城湾站全年降水主要存在30~35 a 1个特征时间尺度,存在33 a 1个明显的波峰,所以该站全年降水的第一主周期为33 a;由图4e可知,党河水库站全年降水主要存在3~8 a和50~60 a 2个特征时间尺度,存在55 a、8 a、4 a 3个明显的波峰,所以该站全年降水的第一主周期为55 a,第二主周期为8 a,第三主周期为4 a。

3.5 降水持续性分析

结合图5和表3分析结果可知,疏勒河流域5个水文站降水量的Hurst指数分别为:昌马堡站(0.7169)、潘家庄站(0.7489)、双塔堡水库站(0.6980)、党城湾站(0.7259)、党河水库站(0.6984),均>0.5,表明未来降水量将与过去60 a左右的变化趋势相同,即表现出正持续性特征,故可预测未来一段时间该站降水量将出现增长趋势。其中,潘家庄站Hurst指数最大为0.7489,表现为较强的正持续性。

3.6 降水不均匀性与集中度变化分析

由图6和表4可知,疏勒河流域各站降水集中度波动范围,多年平均值为0.58。昌马堡站降水量集中度(PCD)呈现微弱下降趋势,倾向率为0.007·$(10a)^{-1}$,近60 a集中度(PCD)有32 a大于均值,说明降水分配较集中;潘家庄站集中度(PCD)呈现下降趋势,倾向率为0.017·$(10a)^{-1}$,有32 a大于均值,说明降水分配较集中;双塔堡水库站集中度(PCD)呈现微弱下降趋势,倾向率为0.015·$(10a)^{-1}$,有29 a大于均值,说明降水分配较集中;党城湾站集中度(PCD)呈现微弱下降趋势,倾向率为0.003·$(10a)^{-1}$,有29 a大于均值,说明降水分配较集中;党河水库站集中度(PCD)呈现下降趋势,倾向率为0.01·$(10a)^{-1}$,有28 a大于均值,说明降水分配较集中。

从图7和表4可以看出,疏勒河流域各站降水年内分配不均匀系数(C_v)变化范围和多年平均值。其中,流域年内降水多年平均值均为0.53,表现出多年降水量分配较不均匀。该流域近60 a以来降水不均匀系数呈递减趋势,昌马堡站倾向率为−0.002·$(10a)^{-1}$;潘家庄站倾向率为−0.002·$(10a)^{-1}$。双塔堡水

表2　疏勒河流域各站降水量变化趋势分析

Tab. 2　Trend analysis of precipitation changes at each station in the Shule River Basin

指标	线性回归	Sen's	M-K检验Z值	趋势	明显程度
昌马堡	0.505	0.558	2.75	上升	明显
潘家庄	0.069	0.055	0.32	上升	不明显
双塔堡水库	0.111	0.087	0.67	上升	不明显
党城湾	0.923	0.354	2.24	上升	明显
党河水库	0.056	0.371	0.27	上升	不明显

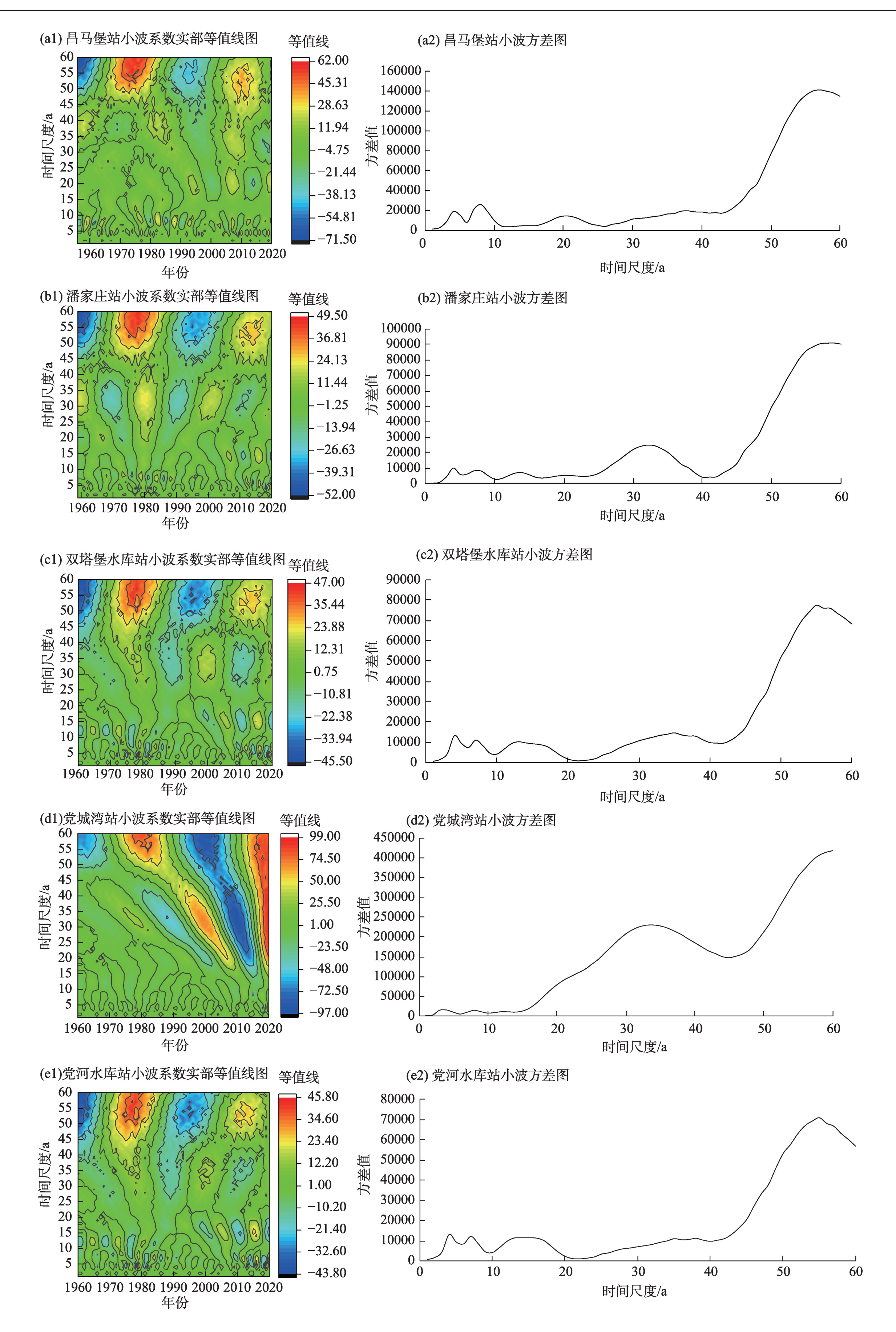


图4 疏勒河流域降水的小波周期性分析

Fig. 4 Wavelet periodicity analysis of precipitation in the Shule River Basin

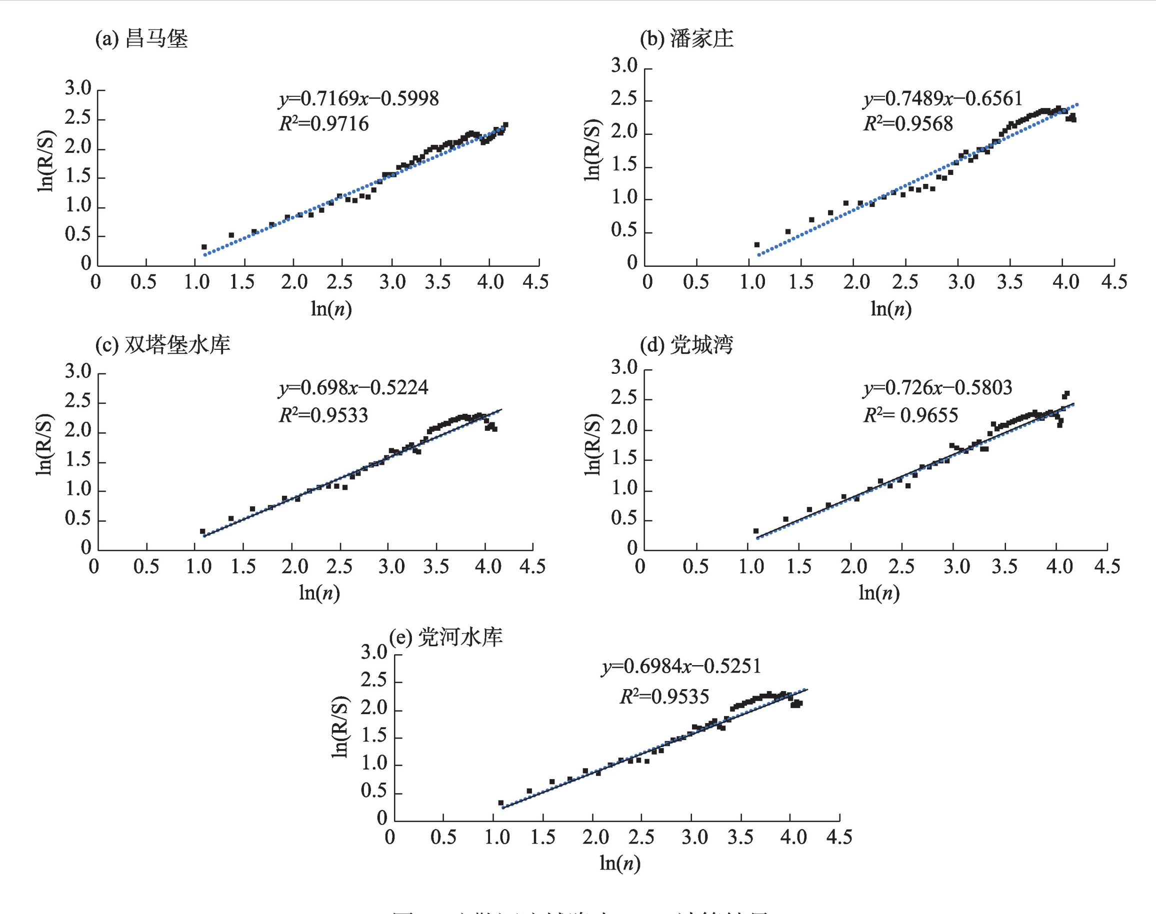


图5 疏勒河流域降水Hurst计算结果

Fig. 5 Calculated results of precipitation Hurst in Shule River Basin

表3 疏勒河流域降水持续性分析结果

Tab. 3 Results of precipitation persistence analysis in the Shule River Basin

	昌马堡	潘家庄	双塔堡水库	党城湾	党河水库
Hurst指数	0.7169	0.7489	0.6980	0.7259	0.6984
拟合R^2	0.9716	0.9568	0.9533	0.9655	0.9535

库站倾向率为−0.012·(10a)$^{-1}$。党城湾站倾向率为−0.007·(10a)$^{-1}$。党河水库站倾向率为−0.008·(10a)$^{-1}$。

综上所述,降水量集中度(PCD)和不均匀系数(C_v)呈现微弱的递减趋势,其中,倾向率潘家庄站0.017·(10a)$^{-1}$>双塔堡水库站0.015·(10a)$^{-1}$>党河水库站0.01·(10a)$^{-1}$>潘家庄站0.007·(10a)$^{-1}$>党城湾站0.003·(10a)$^{-1}$,流域年降水量较为集中;不均匀系数昌马堡站、潘家庄站−0.002·(10a)$^{-1}$>党城湾站−0.007·(10a)$^{-1}$>党河水库站−0.008·(10a)$^{-1}$>双塔堡水库站−0.012·(10a)$^{-1}$。

4 降水变化趋势差异性分析

本文从疏勒河流域年降水量变化特征、趋势性、周期性、持续性、不均匀性和集中度进行了分析,区别于以往只对该区域进行常规线性分析或对个别站点进行探讨,对分析整个疏勒河流域存在一定的局限性[3,26-29]。通过趋势性分析和检验表明,过去几十年内该区域降水量呈现上升趋势,已有研究也表明了该结论,与孙栋元等[3]、刘国红[28]研究结果一致性较高;结合该流域5个水文站分析可知,年降水量从东往西降水量依次减少,从南到北也依次减少,与张重花等[30]、郑续等[31]分析得出该流域1958—2018年从上游到下游降水量衰减,整个流域降水量呈增加趋势。

疏勒河流域由于受全球气候变暖和特殊的地理位置因素,同时受西风带环流和气流扰动作用,西南部山区随着海拔升高降水呈现增长趋势,为此降水和冰雪融水是整个流域水资源的主要来源。

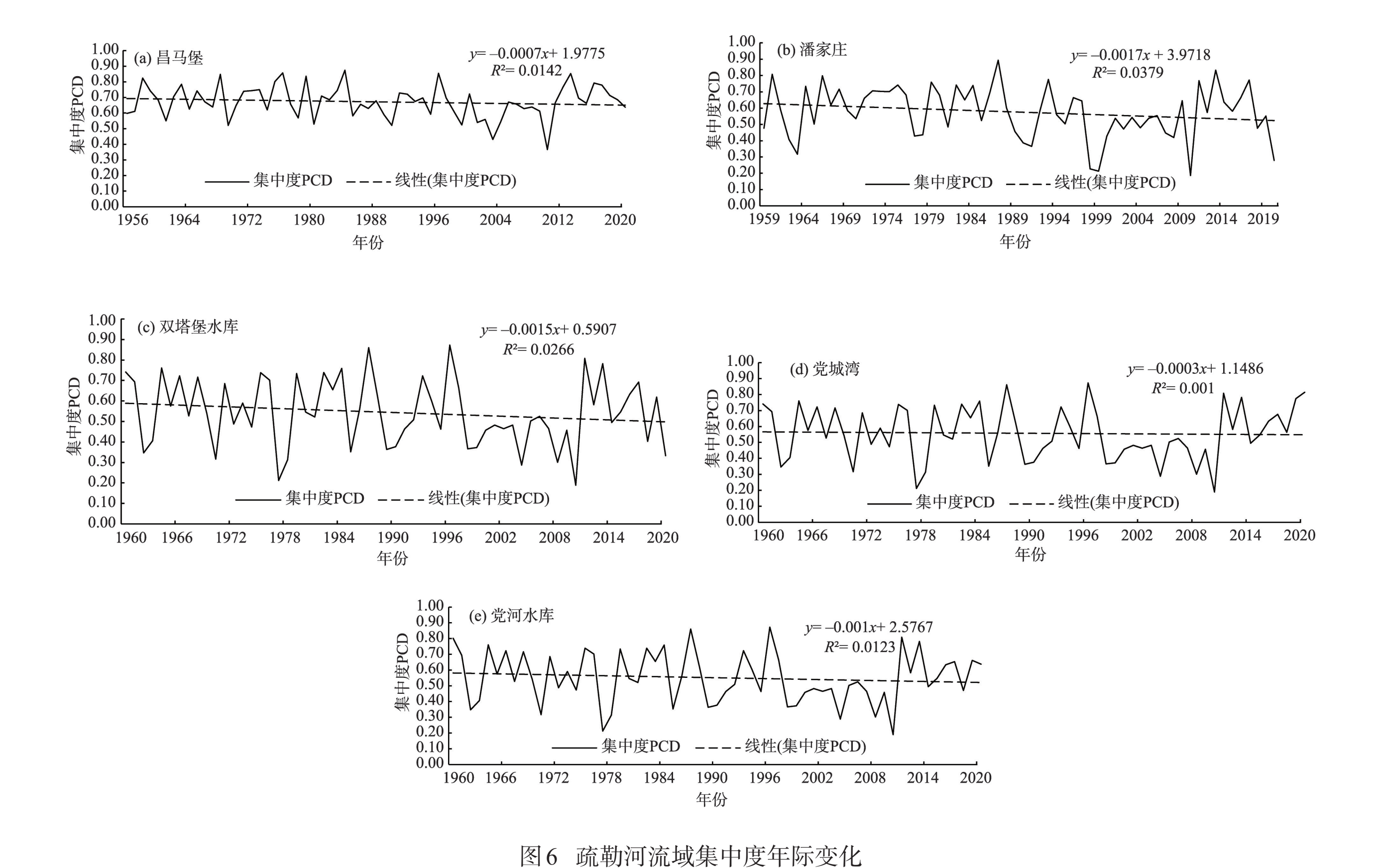


图6 疏勒河流域集中度年际变化

Fig. 6 Interannual variation curve of concentration in the Shule River Basin

表4 疏勒河流域各站降水量集中度和分配不均匀系数分析结果

Tab. 4 Analysis results of precipitation concentration and distribution inhomogeneity coefficient of each station in Shule River Basin

	波动范围		多年平均值		集中度(PCD)大于平均值年数
	集中度(PCD)	分配不均匀系数(C_v)	集中度(PCD)	分配不均匀系数(C_v)	
昌马堡	0.37~0.87	0.32~0.7	0.67	0.53	32 a
潘家庄	0.19~0.89	0.33~0.72	0.58	0.53	32 a
双塔堡水库	0.19~0.87	0.34~0.70	0.54	0.53	29 a
党城湾	0.19~0.87	0.34~0.70	0.56	0.53	29 a
党河水库	0.19~0.87	0.34~0.70	0.55	0.53	28 a

由于该流域南高北低,夏季的暖湿气流被阻挡在南部山区,而冬季盛行西北风导致降水少,使得南部山区降水呈现季节性变化,流域北部平原不利于留住暖湿气团,很难形成降水,造成了北边平原干旱少雨的气候特征。此流域与受季风环流影响的河西走廊黑河和石羊河不同,因而其山区气候变化与其余两条河流存在较大差异,为此导致南部山区降水明显多于平原地区的降水,呈现出从东南向西北依次减少的规律[30-32,1]。因此,综合分析降水的形成和变化特征,有助于合理利用该流域的水资源,需要综合考虑多种因素。

虽然,本研究用长序列多要素对降雨进行了分析,但是每种要素仅用一种分析方法具有一定局限性,由于干旱内陆地区的特殊性在今后的研究中需要结合最优降水插值法,并考虑气温、气流运动等多种自然因素的影响对该流域降水特征进行分析,况且以往对该区域的降水趋势性研究已有很多,但未来降水特征如何变化需要更加深入的理解,用多种方法进行分析来降低误差,来探讨未来的时空变化[33-36]。

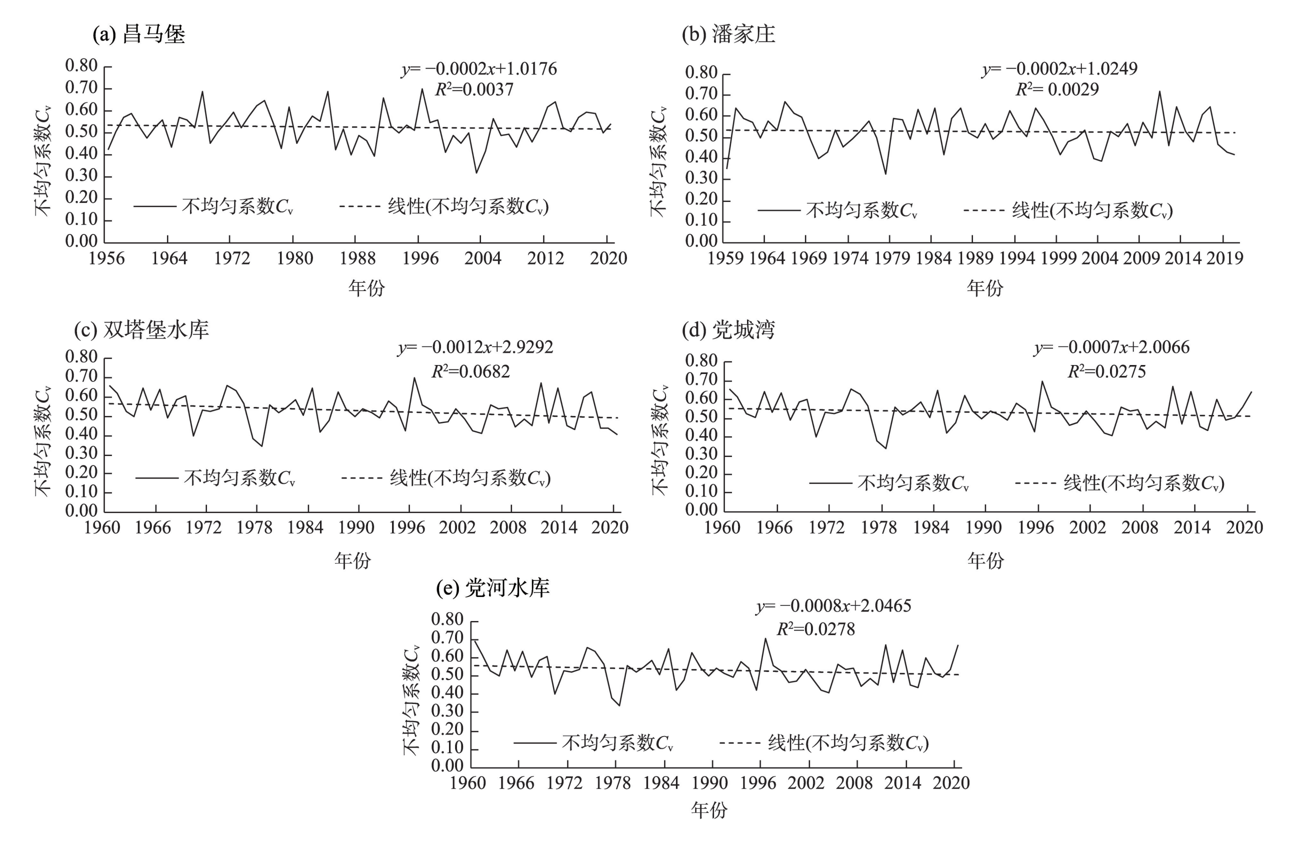


图7　疏勒河流域不均匀系数年际变化

Fig. 7　Interannual variation curve of the inhomogeneity coefficient of the Shule River Basin

5　结 论

本文利用疏勒河流域5个水文站逐月降水量实测资料，分析了年降水演变特性和变化特征，得出下述主要结论：

（1）昌马堡（1956—2020年）、潘家庄（1959—2020年）、双塔堡水库、党城湾和党河水库（1960—2020年）多年实测年均降雨量分别为96.4 mm、51.4 mm、52.03 mm、61.3 mm、51.8 mm，并且年均降雨量以5.47 mm·$(10a)^{-1}$、0.69 mm·$(10a)^{-1}$、1.11 mm·$(10a)^{-1}$、9.23 mm·$(10a)^{-1}$和0.57 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加。证实该流域由南向北降水量的增长率和多年平均值均呈现递减。

（2）昌马堡站和党城湾站Z值分别为2.75和2.24，增长趋势明显，而双塔堡站、潘家庄站和党河水库站Z值分别为0.32、0.67和0.27，增长趋势不明显。由于疏勒河流域各站年降水线性倾向率和累积距平曲线波动不同，所以年降水量呈现不同程度的增加趋势，降水量均呈现不同时段升降变化过程。

（3）昌马堡在1966年和2000年发生突变；潘家庄在1990年和2015年左右发生突变；双塔堡水库在1990年和2012年左右发生突变；党城湾在1972年和2015年左右发生突变；党河水库无明显突变现象。各站在近代突变后降水递增趋势波动升高，而党河水库站则呈现波动降低，从各站突变特征曲线处于置信水平线之内情况来看，与M-K趋势分析结果一致。

（4）该流域5个站点全年降水量的第一主周期除党城湾站为33 a，其余站大概以55 a左右为主，在第一主周期时间尺度上降水量“丰–枯”交替出现，呈准2次震荡，其中党城湾在2020年后继续增长，该时段的周期变化较为稳定，具有全域性。

（5）疏勒河流域多年降水量集中度（PCD）和分配不均匀系数（C_v）分别大致在0.19~0.89和0.32~0.72之间波动，降水量集中度（PCD）和分配不均匀系数（C_v）呈现微弱的下降趋势，均有趋于均匀化的倾向。该流域5个站点降水量集中度（PCD）大于均值的分别有32 a、32 a、29 a、29 a、28 a，说明该流域

降水分配较集中，其中昌马堡站降水量集中度最大为0.67，该站多年降水最为集中。

参考文献(References)：

[1] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Zhao Wei. Study on the Isotopes and Moisture Source in Precipitation in the Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[2] 杨雪琪, 武玮, 桑国庆, 等. 山东省典型河流近60 a降水演变规律分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 515-523. [Yang Xueqi, Wu Wei, Sang Guoqing, et al. Precipitation evolution law of typical rivers in Shandong Province in recent 60 a[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology), 2022, 36(5): 515-523.]

[3] 孙栋元, 齐广平, 鄢继选, 等. 疏勒河干流降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 291-303. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Yan Jixuan, et al. Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 291-303.]

[4] 杨俊, 徐智, 兰立军, 等. 黄土高原典型小流域降水变化特征研究[J]. 中国水土保持, 2022(8): 25-28. [Yang Jun, Xu Zhi, Lan Lijun, et al. Study on the characteristics of precipitation changes in typical small watersheds on the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(8): 25-28.]

[5] 王晖, 隆霄, 马旭林, 等. 近50 a中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 712-718. [Wang Hui, Long Xiao, Ma Xulin, et al. Precipitation in the eastern part of Northwest China in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 712-718.]

[6] 马建琴, 和鹏飞. 1951—2013年周口地区降水时空变化特征研究[J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2017, 38(2): 20-24. [Ma Jianqin, He Pengfei. Temporal and spatial distribution of precipitation in Zhoukou area from 1951 to 2013[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(2): 20-24.]

[7] 郑新倩, 李新建, 杨帆, 等. 1961—2010年乌鲁木齐降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 178-184. [Zheng Xinqian, Li Xinjian, Yang Fan, et al. Changing features of precipitation in Urumqi during 1961-2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(11): 178-184.]

[8] 齐天杰, 李元, 朱长军, 等. 盐城市1960—2020年降水变化规律研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 115-120. [Qi Tianjie, Li Yuan, Zhu Changjun, et al. Variation law of precipitation in Yancheng from 1960 to 2020[J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(3): 115-120.]

[9] 张静雯, 付小莉, 张洪. 区域降水时序特征变化综合分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 45-51, 61. [Zhang Jingwen, Fu Xiaoli, Zhang Hong. A comprehensive analysis of regional precipitation time series characteristics changes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(1): 45-51, 61.]

[10] 王静. 疏勒河干流平原区降水量年内分配及时序演变分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(6): 14-18. [Wang Jing. Analysis of intra-annual distribution and temporal evolution of precipitation in the plain area of Shule River main stream[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 58(6): 14-18.]

[11] 刘普幸, 张克新, 霍华丽, 等. 疏勒河中下游绿洲胡杨林土壤水盐的空间变化特征与成因[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 942-952. [Liu Puxing, Zhang Kexin, Huo Huali, et al. Characteristics and causes of the spatial variations of soil water and salt content under *Populus euphratica* Oliv. in the middle and lower reaches of the Shule River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 942-952.]

[12] 代慧慧. 疏勒河流域气候变化对径流的影响分析[D]. 北京: 清华大学, 2015. [Dai Huihui. Analysis of the Impact of Climate Change on Runoff in the Shule River Basin[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.]

[13] 牛最荣, 王启优, 孙栋元, 等. 基于径流还现的洮河流域径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 149-157. [Niu Zuirong, Wang Qiyou, Sun Dongyun, et al. Runoff variation characteristics of Taohe River Basin based on calculation of current runoff [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 149-157.]

[14] 常周梅, 胡文博, 张丽娟. 西宁市1951—2015年气温及降水量变化特征[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 7-11. [Chang Zhoumei, Hu Wenbo, Zhang Lijuan. Change characteristics of temperature and precipitation from 1951 to 2015 in Xining City[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 7-11.]

[15] 刘纯. 基于多方法的变化环境下渭河水文气象要素变异诊断[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021. [Liu Chun. Variation Diagnosis of Hydrometeorological Elements in Weihe River under Changing Environment Based on Multiple Meth[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.]

[16] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68-76. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 68-76.]

[17] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531. [He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531.]

[18] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477. [Gao Yanchun, Wang Jinfeng, Feng Zhiming. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467-477.]

[19] 何萍, 敖成寅. 云南高原楚雄市近50年气温、降水变化特征分析[J]. 楚雄师范学院学报, 2022, 37(3): 101-107. [He Ping, Ao

Chengyin. Study on the characteristics of temperature and precipitation change in Chuxiong City on the Yunnan Plateau in recent 50 years[J]. Journal of Chuxiong Normal University, 2022, 37(3): 101-107.]

[20] 王飞, 朱仲元, 郝祥云, 等. 锡林河流域降雪集中度集中期变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 239-247. [Wang Fei, Zhu Zhongyuan, Hao Xiangyun, et al. Variation characteristics of snowfall concentration period in Xilin River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 239-247.]

[21] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近60 a黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1333-1344. [An Bin, Xiao Weiwei, Zhu Ni, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1333-1344.]

[22] 杨超弈, 陈旻, 张陵蕾, 等. 雅鲁藏布江中游悬移质输沙率的周期性与不均匀性分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 46-54, 60. [Yang Chaoyi, Chen Min, Zhang Linglei, et al. An analysis of the periodicity and inhomogeneity of suspended sediment transport rates in the middle reaches of Yarlung Zangbo River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 46-54, 60.]

[23] 贾玲, 张百祖, 牛最荣, 等. 疏勒河上游径流变化与预测分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1588-1597. [Jia Ling, Zhang Baizu, Niu Zuirong, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1588-1597.]

[24] 胡砚霞, 王长青. 汉江流域耕地生产力变化趋势与持续性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1249-1261. [Hu Yanxia, Wang Changqing. Change trend and sustainability analysis of farmland productivity in the Han River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1249-1261.]

[25] 楚纯洁, 周金风. 河南省1960—2018年旱涝演变及其极端与持续性分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 164-171. [Chu Chunjie, Zhou Jinfeng. Extreme and persistent feature of drought-flood evolution in Henan Province during 1960-2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 164-171.]

[26] 颜明慧, 张文春, 刘刚. 疏勒河干流降水时空分布研究[J]. 地下水, 2022, 44(5): 197-200. [Yan Minghui, Zhang Wenchun, Liu Gang. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation in the main stream of Shule River[J]. Ground Water, 2022, 44(5): 197-200.]

[27] 宋阁庆, 李计生, 王若臣. 近50年疏勒河流域降水空间分布规律研究[J]. 地下水, 2016, 38(1): 104-106. [Song Geqing, Li Jisheng, Wang Ruochen. Study on the spatial distribution pattern of precipitation in the Shule River Basin in the past 50 years[J]. Ground Water, 2016, 38(1): 104-106.]

[28] 刘红国. 疏勒河流域水文气象要素趋势分析[J]. 地下水, 2020, 42(3): 184-185. [Liu Hongguo. Trend analysis of hydro-meteorological elements in the Shule River Basin[J]. Ground Water, 2020, 42(3): 184-185.]

[29] 常继青, 牛最荣. 甘肃黄河流域与疏勒河流域降水径流变化特性对比分析[J]. 水文, 2014, 34(5): 94-96. [Chang Jiqing, Niu Zuirong. Comparative analysis of precipitation and runoff change characteristics between Yellow River and Shulehe River in Gansu Province[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 94-96.]

[30] 张重花, 周俊, 龚家国. 气候变化条件下甘肃疏勒河流域暴雨洪水变化趋势研究[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(10): 71-74. [Zhang Chonghua, Zhou Jun, Gong Jiaguo. Study on the change trend of rainstorm and flood in Shule River Basin of Gansu Province under the condition of climate change[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(10): 71-74.]

[31] 郑续, 魏乐民, 郭建军, 等. 基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析——以疏勒河流域为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1477-1485. [Zheng Xu, Wei Lemin, Guo Jianjun, et al. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1477-1485.]

[32] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633-643. [Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 633-643.]

[33] 胡盈. 江西省近20年降水时空特征分析及预测模型研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021. [Hu Ying. Analysis of Temporal and Spatial Characteristics of Precipitation in Jiangxi Province in the Past 20 Years and Research on Prediction Models[D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2021.]

[34] 王澄海, 杨金涛, 杨凯, 等. 过去近60 a黄河流域降水时空变化特征及未来30 a变化趋势[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 708-722. [Wang Chenghai, Yang Jintao, Yang Kai, et al. Changing precipitation characteristics in the Yellow River Basin in the last 60 years and tendency prediction for next 30 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 708-722.]

[35] 曹彦超, 焦美玲, 秦拓, 等. 1973—2020年甘肃河东夏半年降水变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1695-1706. [Cao Yanchao, Jiao Meiling, Qin Tuo, et al. Variation characteristics and influencing factors of summer half-year precipitation in Hedong region of Gansu Province from 1973 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1695-1706.]

[36] 路畅, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2018年中国年降水量及气象干旱的时空变异[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1572-1580. [Lu Chang, Ma Long, Liu Tingxi, et al. Temporal and spatial variations of annual precipitation and meteorological drought in China during 1951-2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1572-1580.]

Characteristics of precipitation changes in the Shule River Basin

JI Zonghu, SUN Dongyuan, NIU Zuirong, WANG Xingfan, WU Lanzhen,
MA Yali, CHEN Caiping, CUI Yanqiang
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University,
Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The annual and monthly precipitation data from five hydrological stations in the Shule River Basin from 1956 to 2020, were analyzed using linear tendency, sliding average, cumulative anomaly, Mann-Kendall mutation test, wavelet analysis, and other methods. The interannual variation process for precipitation in the Shule River Basin and its variation characteristics, such as mutability, trend, periodicity, persistence, heterogeneity, and concentration, were evaluated. The results show that the annual precipitation at each station in the Shule River Basin showed different increasing trends, and the precipitation at each station showed different mutation characteristics. Over the previous 60 years, precipitation in the entire basin presents a relatively uneven distribution on the time scale, and the precipitation in the upstream area is more than that in the downstream. Specifically, the annual precipitation at Changmabao and Dangchengwan stations showed obvious increasing trends, while the increasing trend at Panjiazhuang station and Shuangtabao and Danghe reservoir stations was not obvious. The analysis indicates that precipitation in the basin will continue to show an increasing trend in the coming period.

Keywords: Shule River; precipitation; Mann-Kendall test; trendiness; periodicity; R/S analysis method